

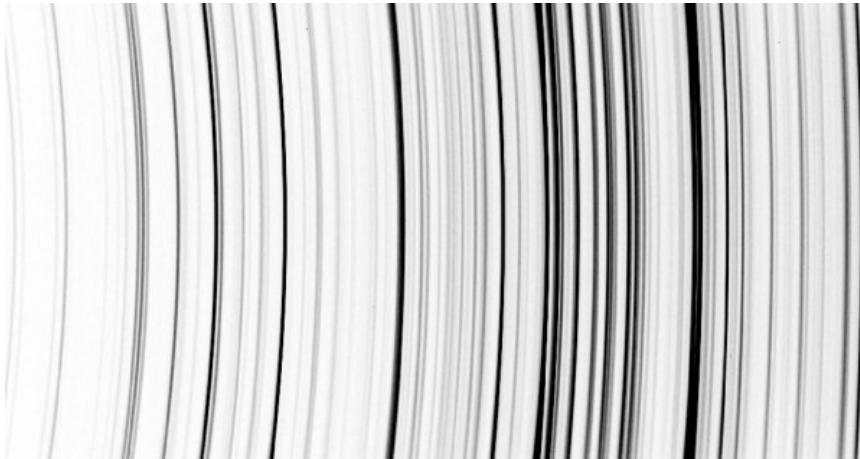
# Многорежимный фокальный редуктор телескопа БТА

## Лекция IV.

Коррекция геометрии и плоское поле (продолжение). Учет фона неба, проблема аппаратного контура. Калибровка потоков.

# Геометрические искажения

Форма линий линейчатого спектра



Направление дисперсии:

SCORPIO-1: по спектрам звездообразных объектов

SCORPIO-2: по 13-точечному тесту

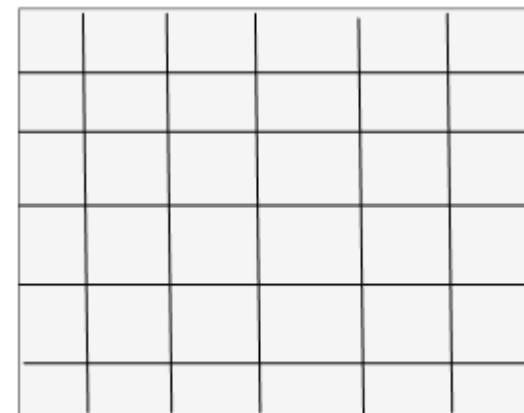


$$(x', y') = G(x, y)$$

$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} x^i y^j, y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} x^i y^j$$
$$(m, n = 2 - 4)$$



$(x, y)$

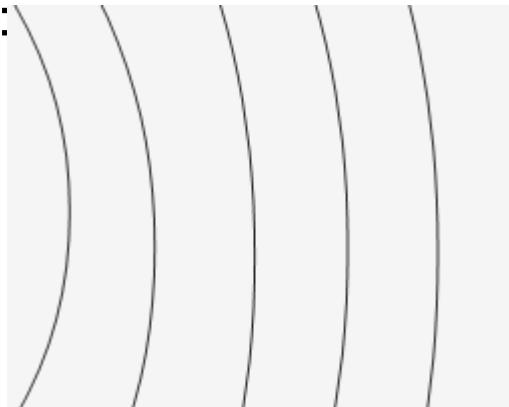


$(x', y')$

# На практике – бывает удобно разделить переменные

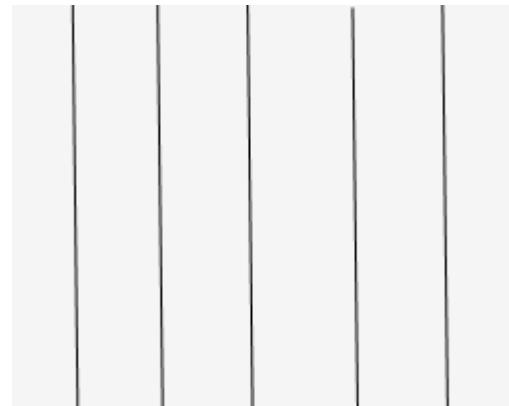
$$(x', y') = G(x, y)$$

1) warp\_x:



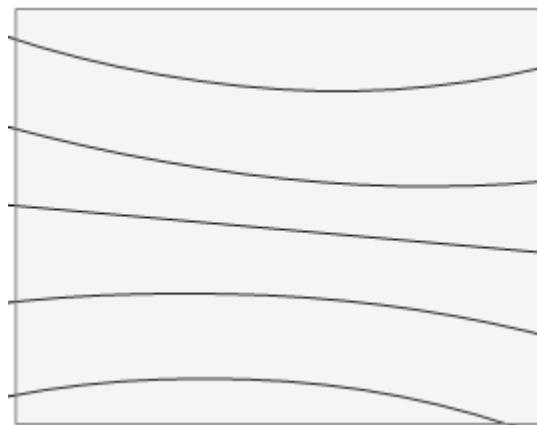
$$x' = G_x(x, y)$$

$$y' = y$$



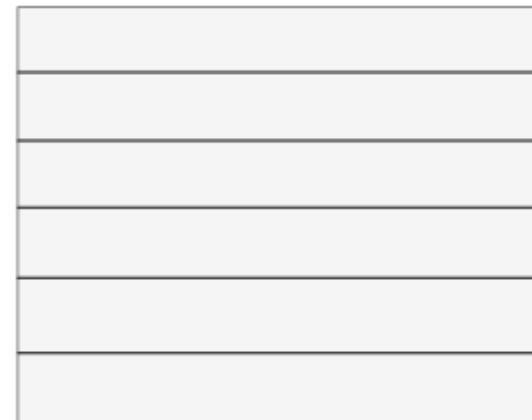
2) Нормировка на flat

3) warp\_y:



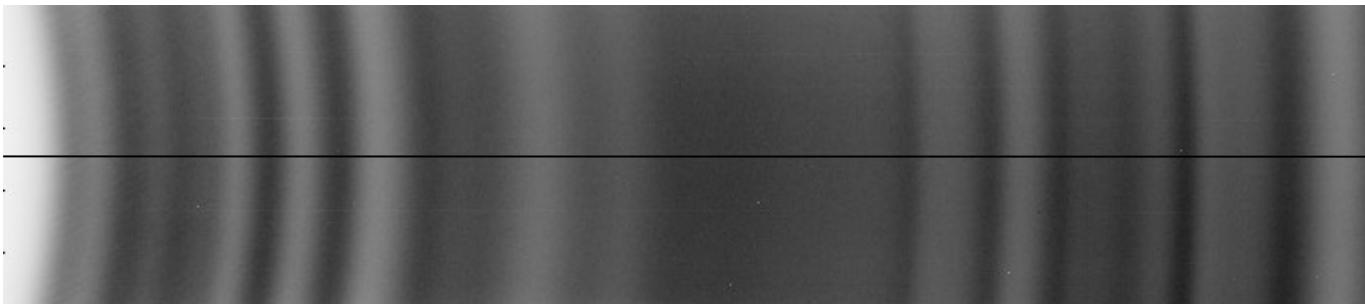
$$x'' = x$$

$$y'' = G_y(x', y')$$

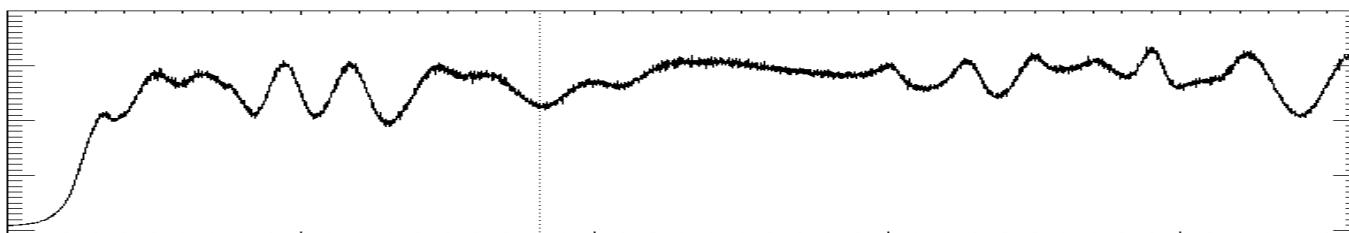


# Нормированный flat field без коррекции

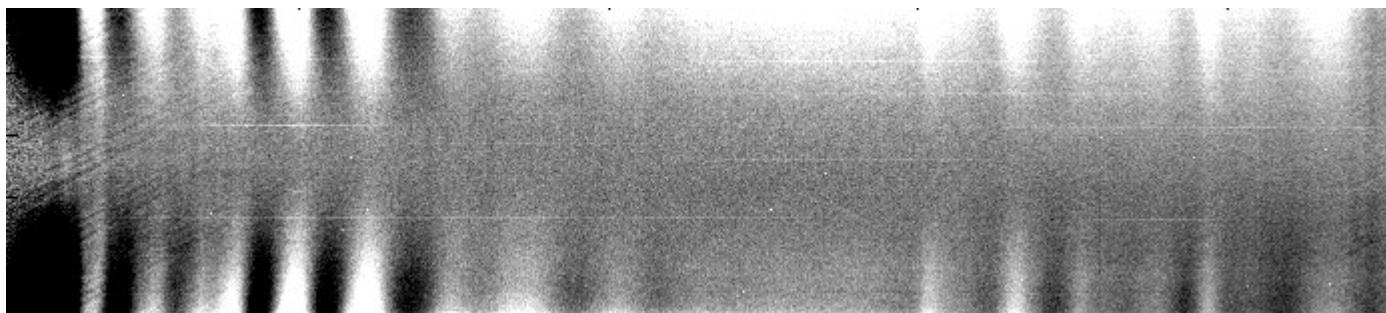
Исходный (flat LEDs, VPHG1200@540)



Разрез через центр:

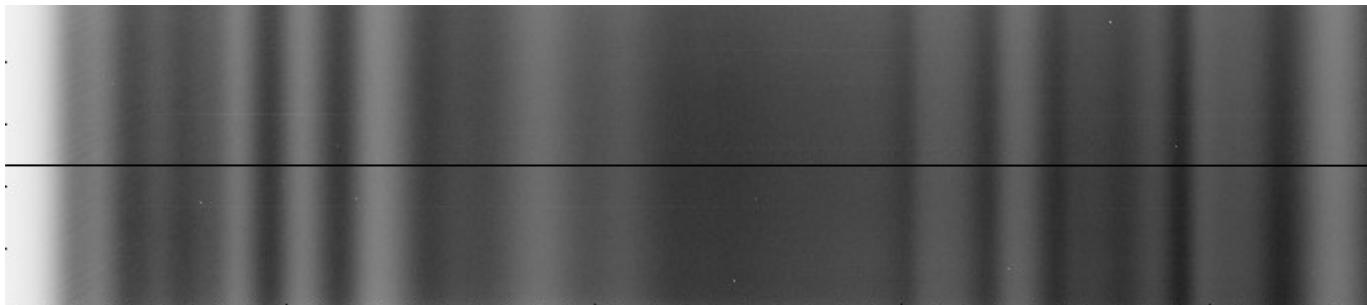


Нормировка (0.9/1.1):

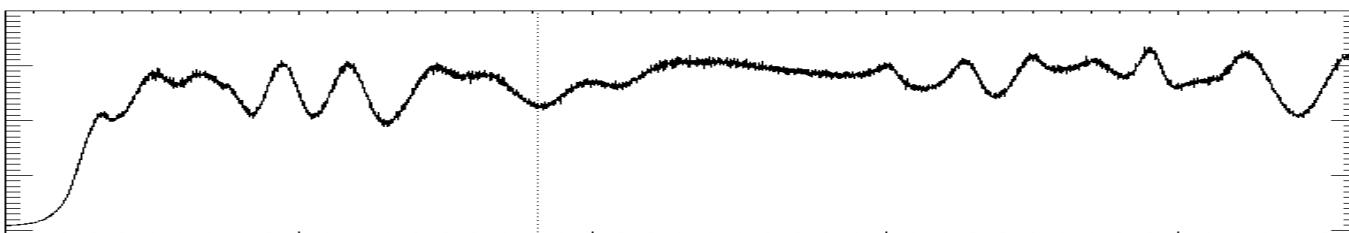


# Нормированный flat field после геометрической коррекции

Исправление по форме линий neon:



Разрез через центр:



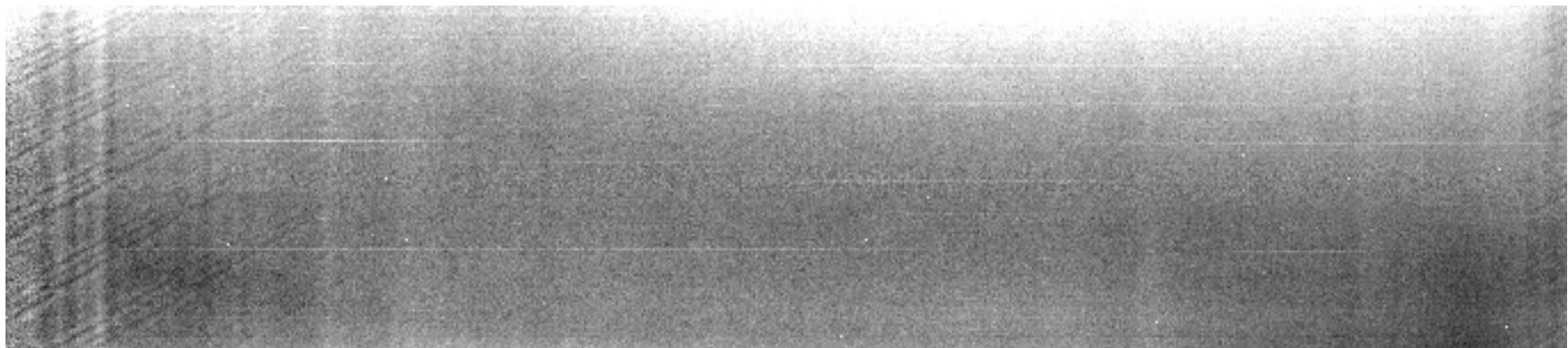
Нормировка (0.9/1.1):



# Проблема выбора оптимальной методики

В спектральном плоском поле смешаны:

- **мелкомасштабные неоднородности**, которые следуют геометрии ПЗС-детектора ( $x,y$ ): попиксельные вариации чувствительности, плохие столбцы, пыль на оптике.
- **крупномасштабные неоднородности**, связанные с геометрией спектров ( $x',y'$ ): пыль на щели, клиновидность щели, виньетирование, неоднородность спектра вдоль дисперсии



# Проблема выбора оптимальной методики

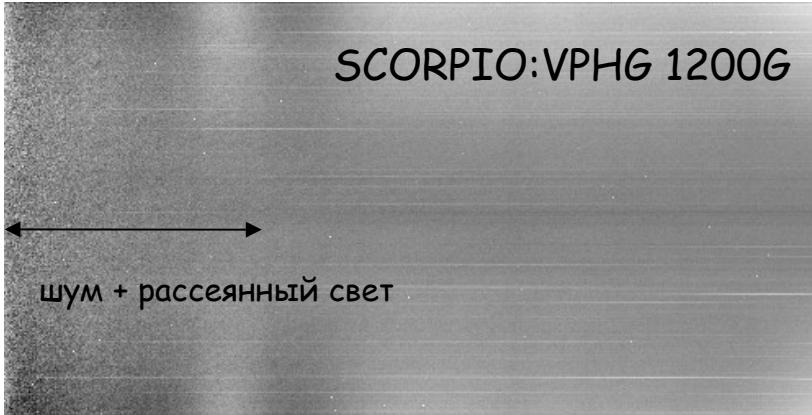
В отличие от фотометрического «плоского поля» (рассветное небо, *superflat* и т. п.), мы не можем равномерно засветить все пиксели, так как есть эффективность решетки и спектральное распределение яркости лампы.

Приходится выбирать различные способы нормировки:

- деление на сглаженный спектр центральных строк
- нормировка на сглаженное изображение (медиана с широким окном и т. п.) для учета мелкомасштабных вариаций + отдельно исправление виньетирования вдоль щели (усреднение сглаженного спектра лампы или неба...).

# Нужно ли вообще деление на flat?

Важно проверить — не вносит ли деление дополнительных шумов



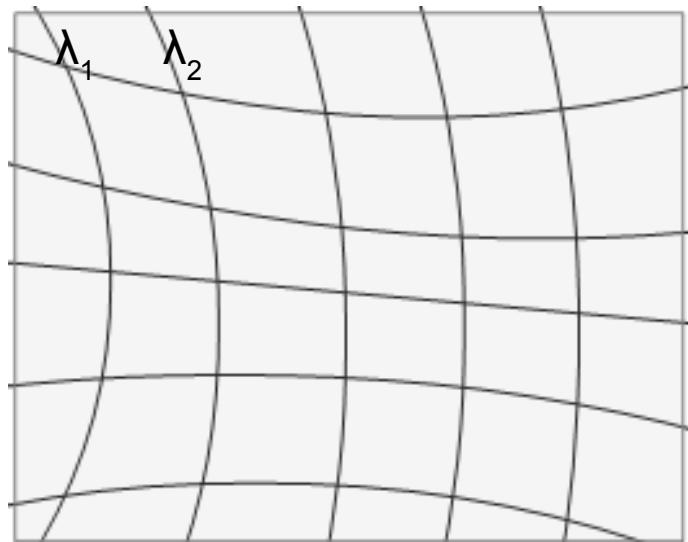
← нормированное плоское поле от галогенной лампы вносит излишние шумы в синей части спектра (Лекция 3)

Часто речь идет об исправлении локальных неоднородностей на уровне <10%. Несущественно при спектроскопии ярких звезд, но может оказаться критически важным при вычитании фона неба для слабых и/или протяженных объектов

# Не объект к калибровкам, а калибровки к объекту!

Обработка современных IFU (MUSE/VLT, CALIFA и т. д.) - идея сохранения первоначальной дискретизации

Т.е. вместо 2D FITS-изображения (запись  $I$  в каждом пикселе) — переход к таблицам, где кроме  $I$ , в каждом пикселе еще записаны преобразованные координаты  $(x',y')$

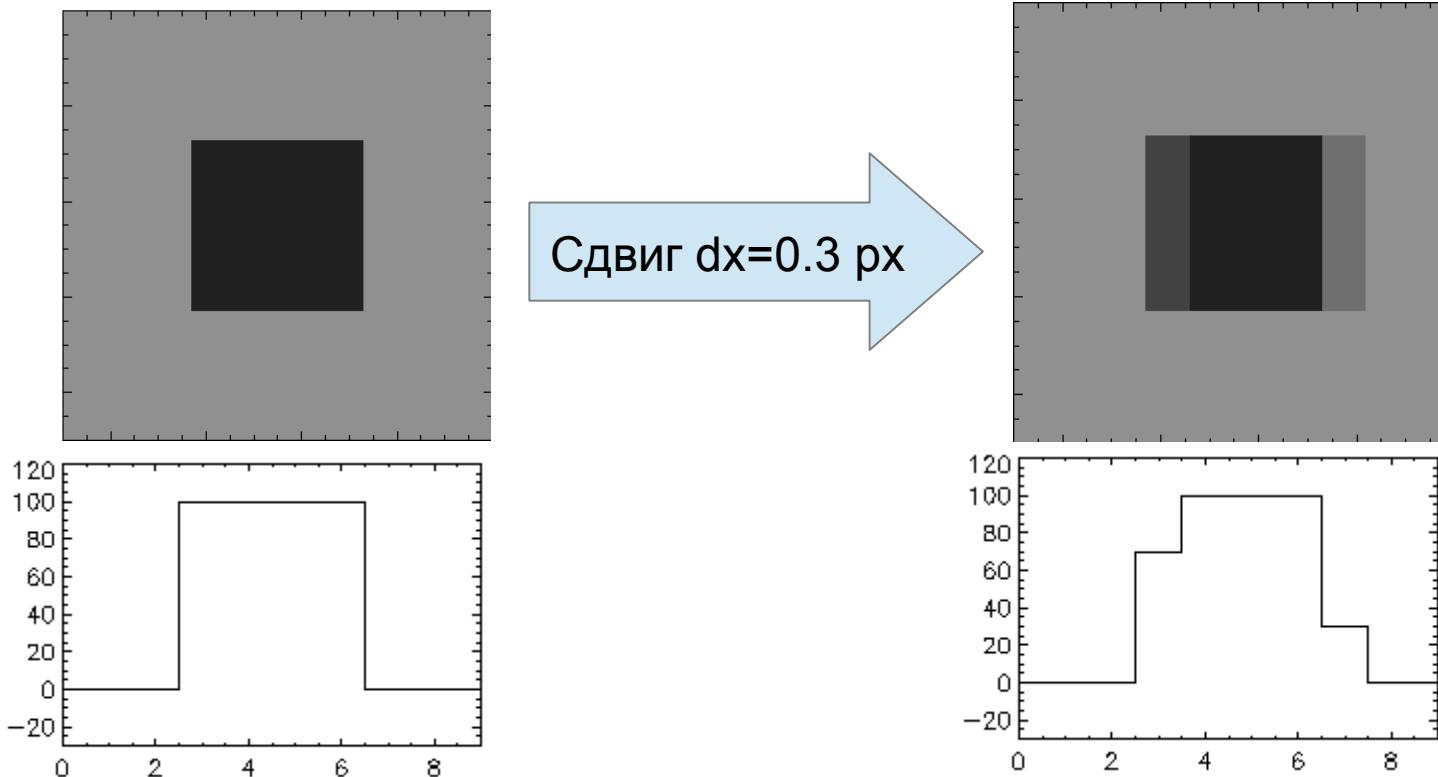


Остаётся лишь одно преобразование — экстракция линеаризованного спектра, после вычитания неба и исправления за кривые пропускания

Но требуется специализированный софт, в том числе и для визуализации на разных этапах обработки + возрастает объем хранимой информации ( $I+x+y$ )

# Проблема интерполяции

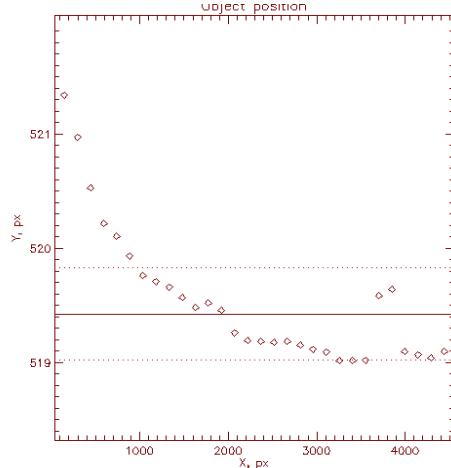
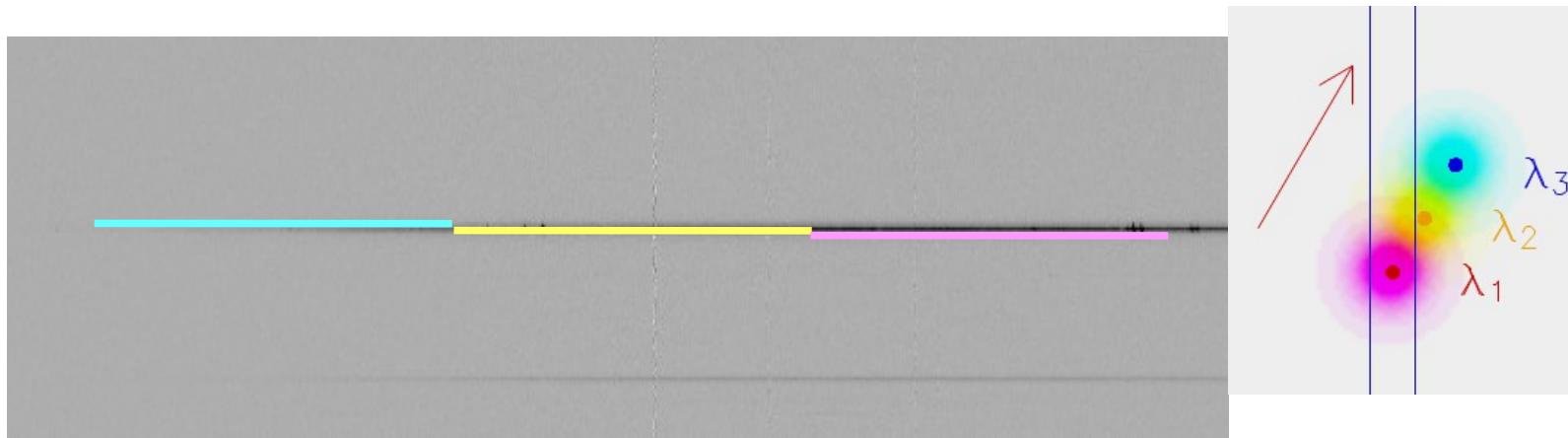
Геометрические преобразования — портят исходное изображение, так как выполняется интерполяция на фиксированную координатную сетку



Искусственное разбиение на более мелкие пиксели — лишь частично решает проблему, сильно загружая вычислительные ресурсы

# И еще о направлении спектров

Даже после исправления геометрических искажений по 13 dots, спектр может быть направлен не точно вдоль X, так как есть атмосферная дисперсия (Лекция 2)

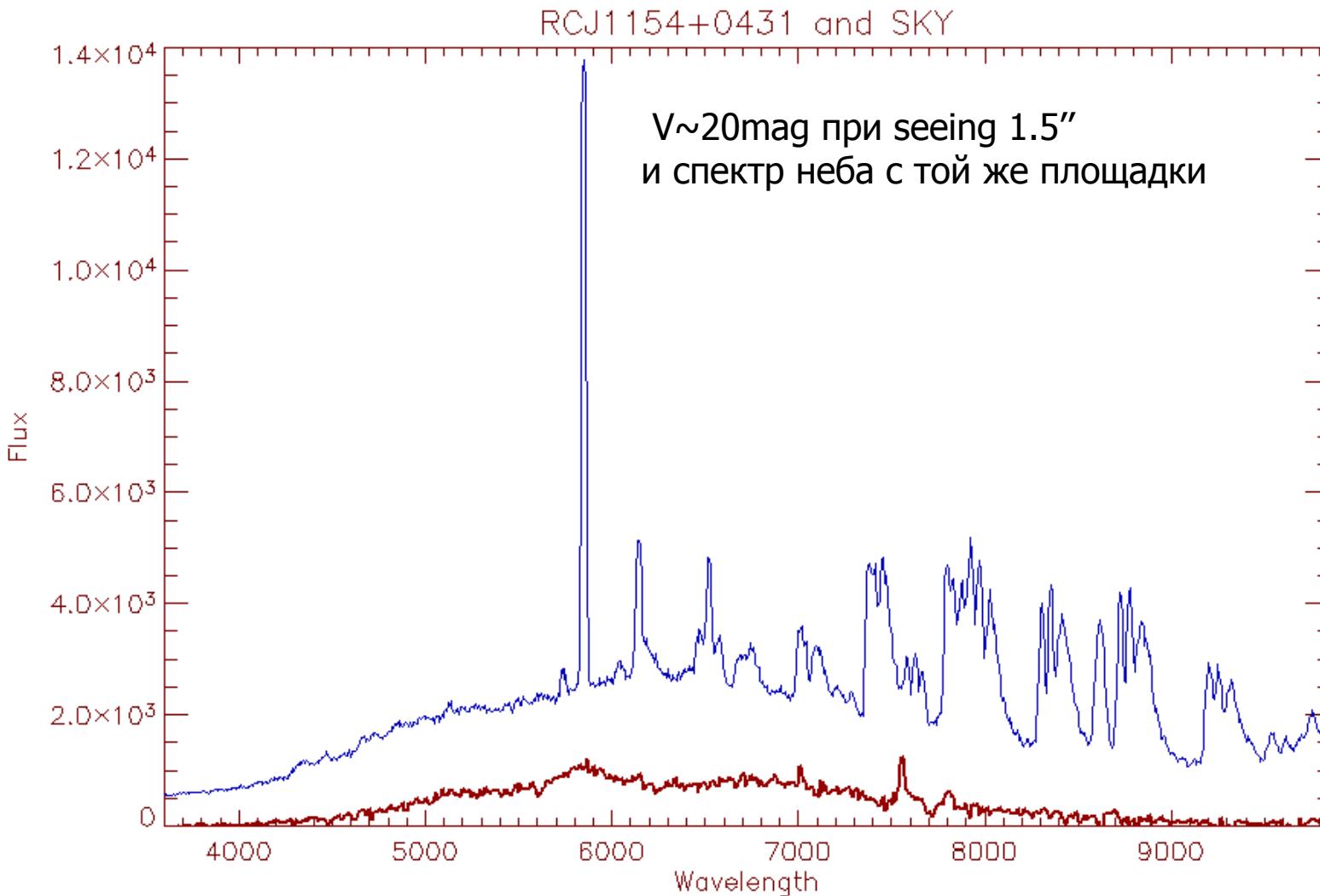


← пример измерения положения ядра галактики NGC4710 для  $z=41$ ,  $dPA=10$ .

В некоторых задачах этот сдвиг может быть существенен (измерение отношения далеко отстоящих линий и т.д.),

Тогда выполняем еще коррекцию по направлению спектра, благо она линейная ( $\Delta$  зависит только от  $x$ ).

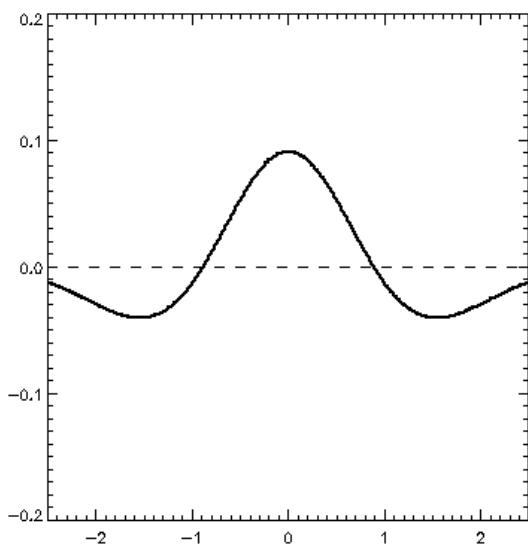
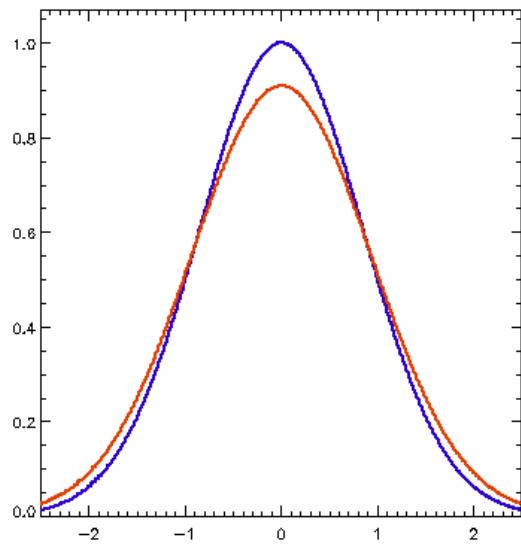
# Вычитание фона неба



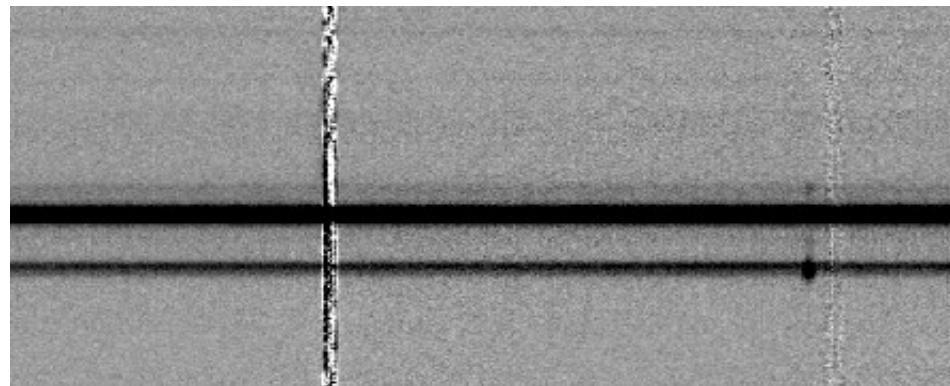
Для слабых объектов «морфологический шум» при вычитании фона неба может оказаться более существенным, нежели формальный шум из статистики фотонов

# Вариации аппаратного контура вдоль щели

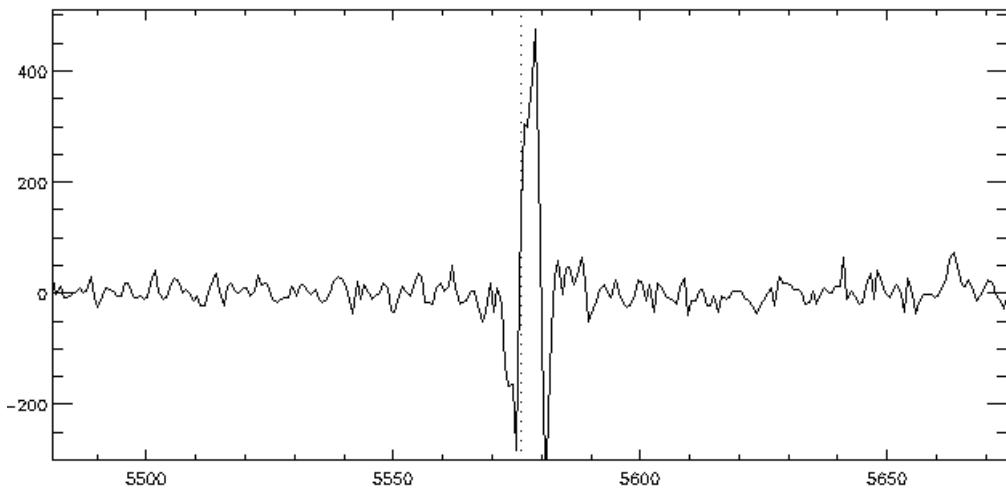
10% разница



[OI]5577

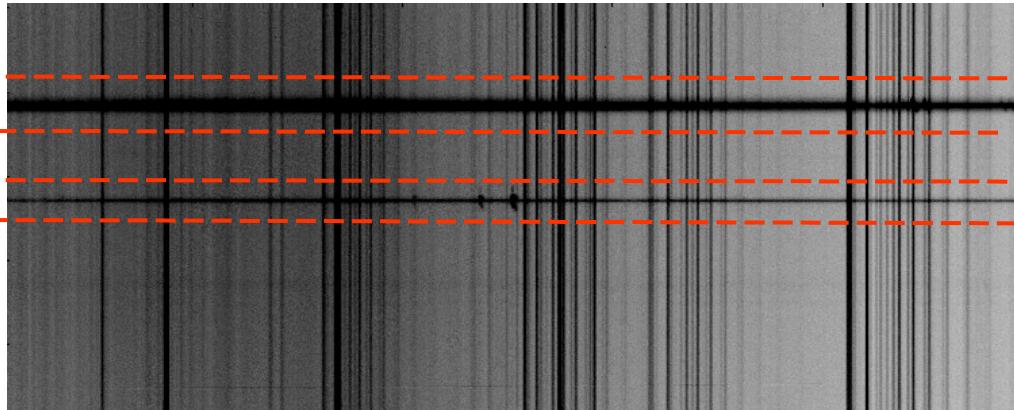


NaD

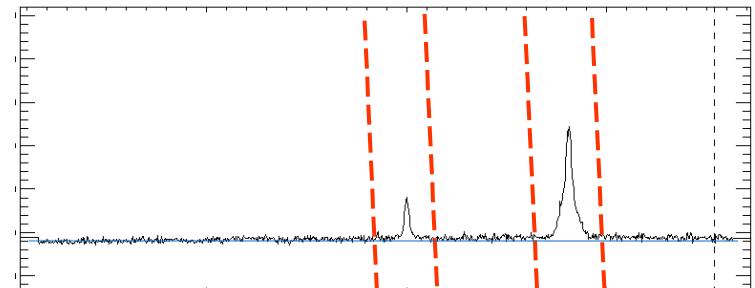


Причина «морфологического шума» - несовпадение инструментальных контуров на объекте и на небе

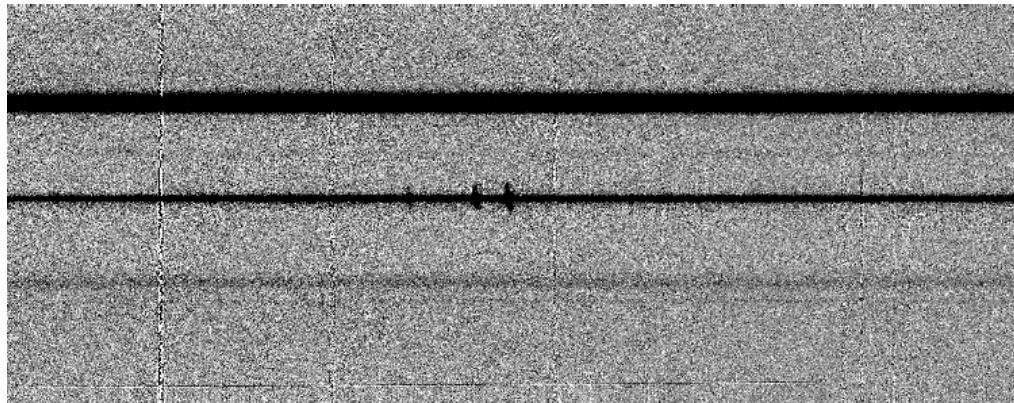
# Вычитание фона неба: протяженные объекты



Аппроксимация спектра неба  
вдоль щели полиномом

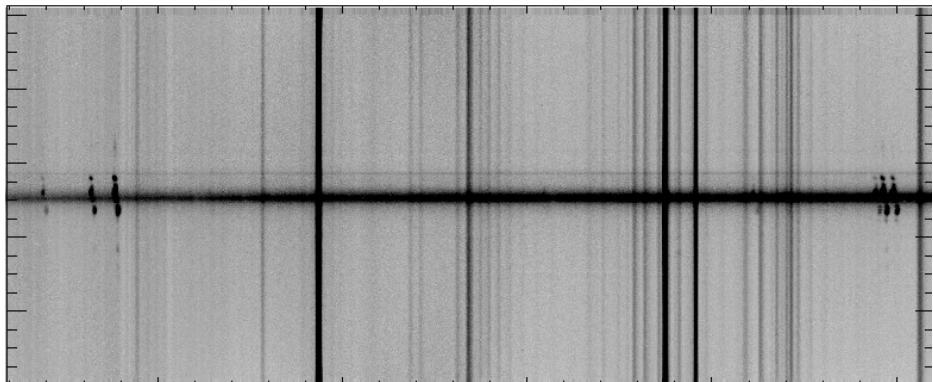


Результат вычитания:

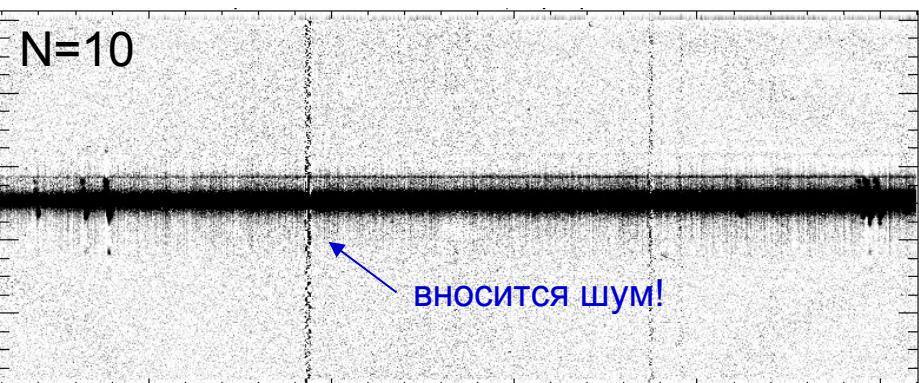
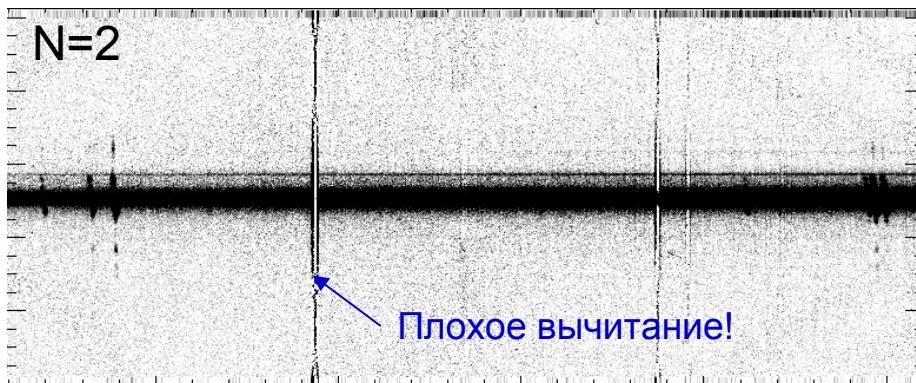
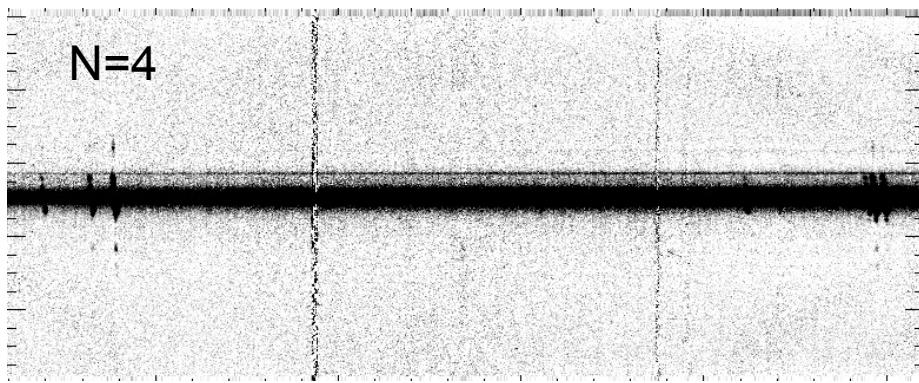
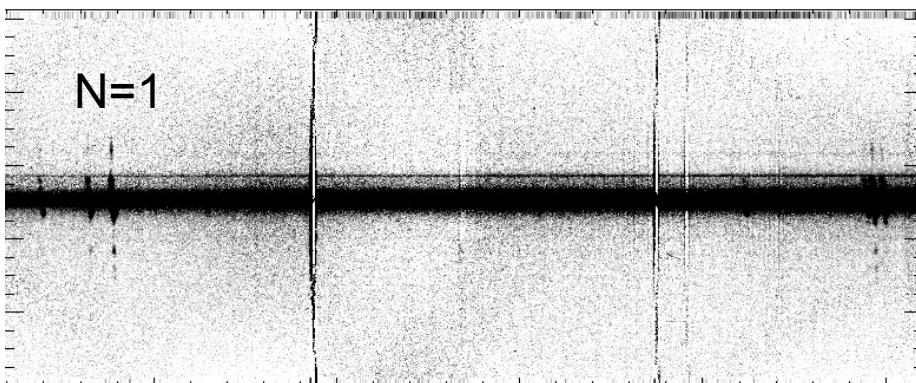


Области вокруг ярких объектов  
исключаются из расчета

# Вычитание фона неба: выбор режима



Оптимальная степень  
полинома  $N=3-4$



# Вычитание фона неба: «продвинутые методы»

Отличие степени полинома от 0 — попытка учесть изменения аппаратного контура вдоль щели (LSF= line spread function). Для спектроскопии слабых протяженных (>2-3') объектов эти вариации особенно существенны и требуется их более строгий учет.

Chilingarian (2009), Katkov & Chilingarian (2011):

- LSF( $\lambda, y$ ) — измеряется по рассветному небу (подгонка солнечным спектром высокого разрешения)
- параметризация LSF (Гаусс-Эрмит)

At every position along the slit, we change the LSF shape inside this night sky spectrum using a Fourier-based technique into the LSF at that slit position. The observed sky spectrum is a convolution of a true spectrum with the LSF:

$$R(\lambda, y) = R_0(\lambda) * LS F(\lambda, y); \quad S(\lambda, y) = S_0(\lambda) * LS F(\lambda, y), \quad (1)$$

where  $\bar{y}$  — position at the sky definition region. The night sky spectrum at current position along slit can be expressed as follows:

$$S(y, \lambda) = FFT^{-1} \left( \frac{FFT(S(\bar{y}, \lambda))}{FFT(R(\bar{y}, \lambda))} \cdot FFT(R(y, \lambda)) \right). \quad (3)$$

# Вычитание фона неба: «продвинутые методы»

144

*Katkov and Chilingarian*

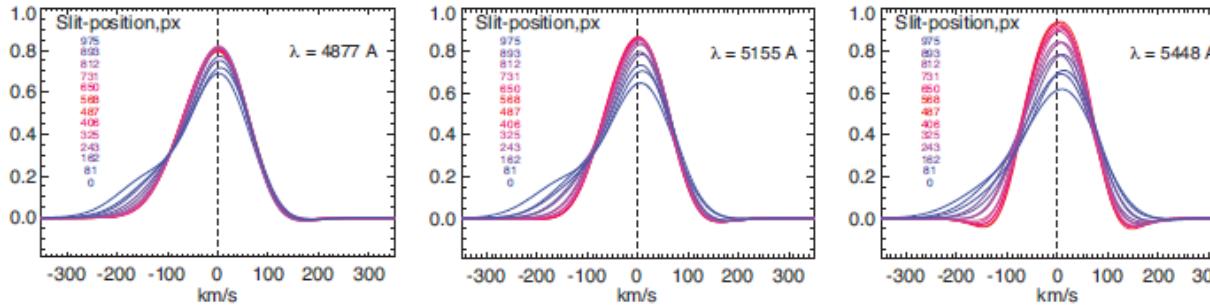


Figure 1. An example of the LSF shape of the SCORPIO reconstructed from the twilight frame at different wavelength and slit positions. We used the Gauss-Hermite LSF representation. One can see that the profile asymmetry increases towards the

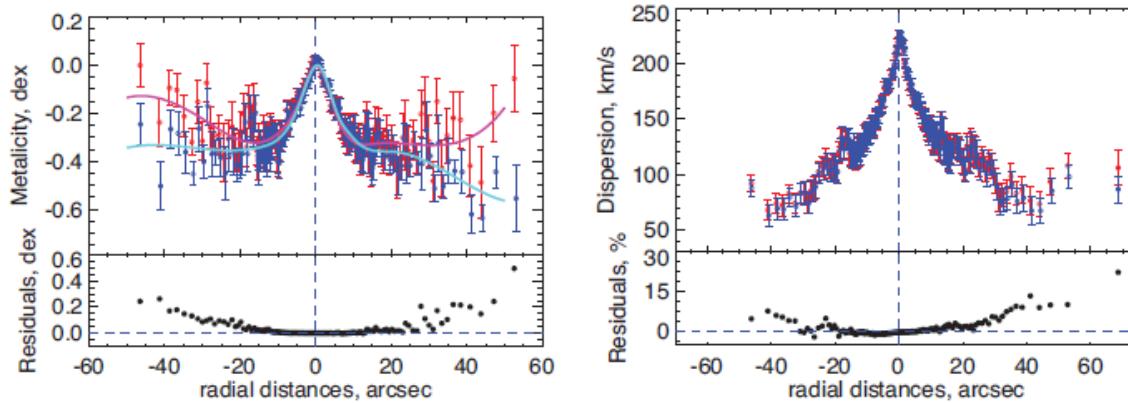
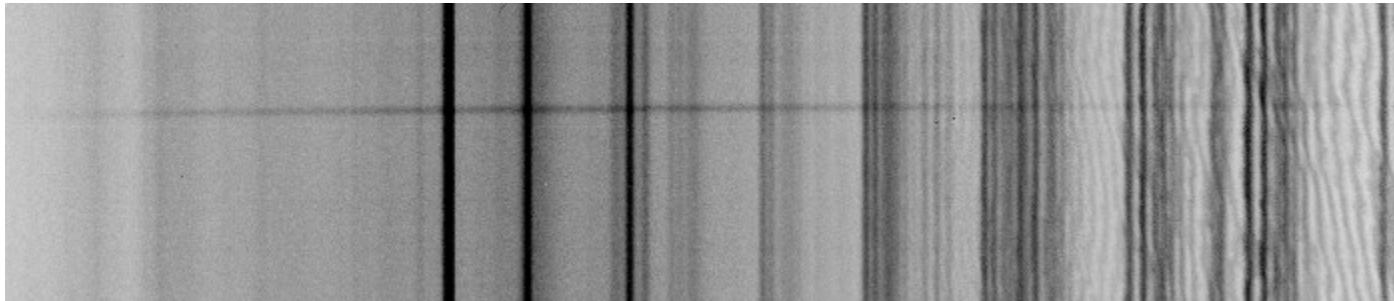
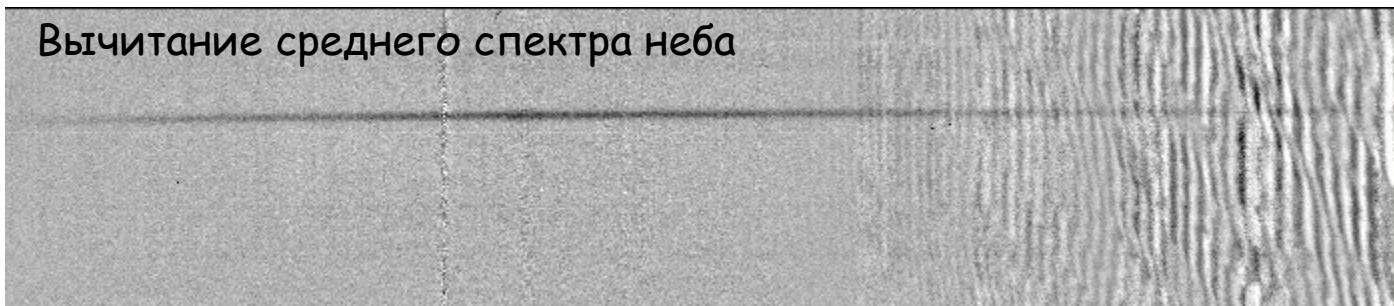


Figure 3. Comparison between traditional technique and our deconvolution. The two panels on the left display the internal velocity dispersion profiles of NGC 5440. Blue data points are for the new technique, while red ones are for the “classical approach”. Differences between the two approaches are displayed in the bottom panel. The two panels on the right hand side display the stellar metallicity profiles of NGC 5440 using the same symbols and colors as on the left hand side panels.

# Сдвиги вдоль щели.



Вычитание среднего спектра неба



Вычитание сдвинутого объекта

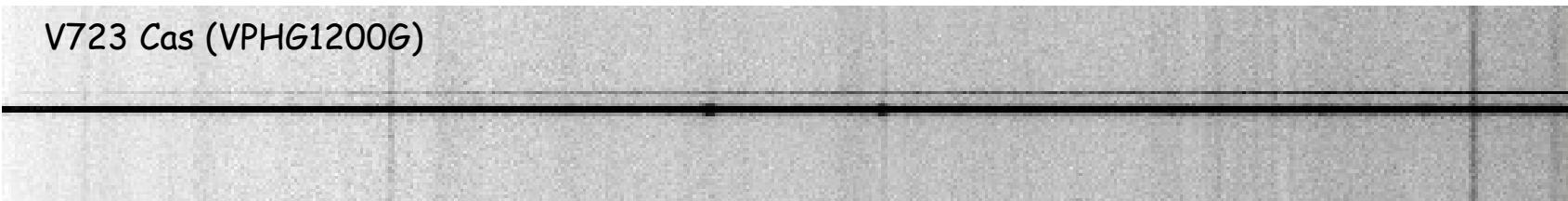
- obj 1  
- obj 2



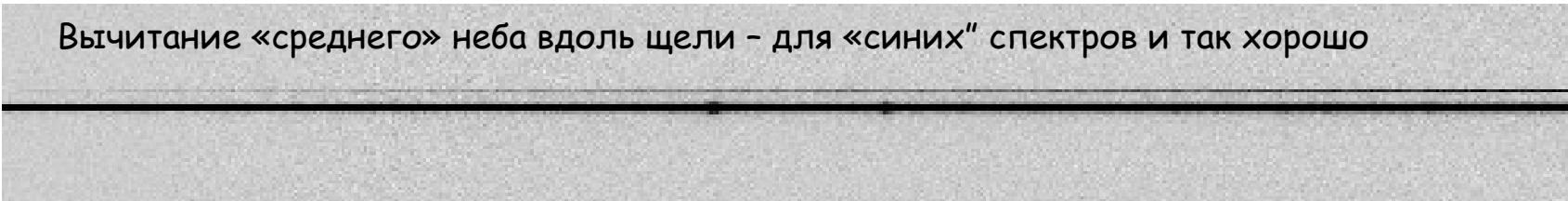
- Значительно лучше вычitaются фринги
- Но меняется относительна интенсивность линий неба – нужны короткие экспозиции (5-10 мин)
- Проблемы с протяженными объектами

# Сдвиги вдоль щели: всегда ли необходимы?

V723 Cas (VPHG1200G)



Вычитание «среднего» неба вдоль щели – для «синих» спектров и так хорошо



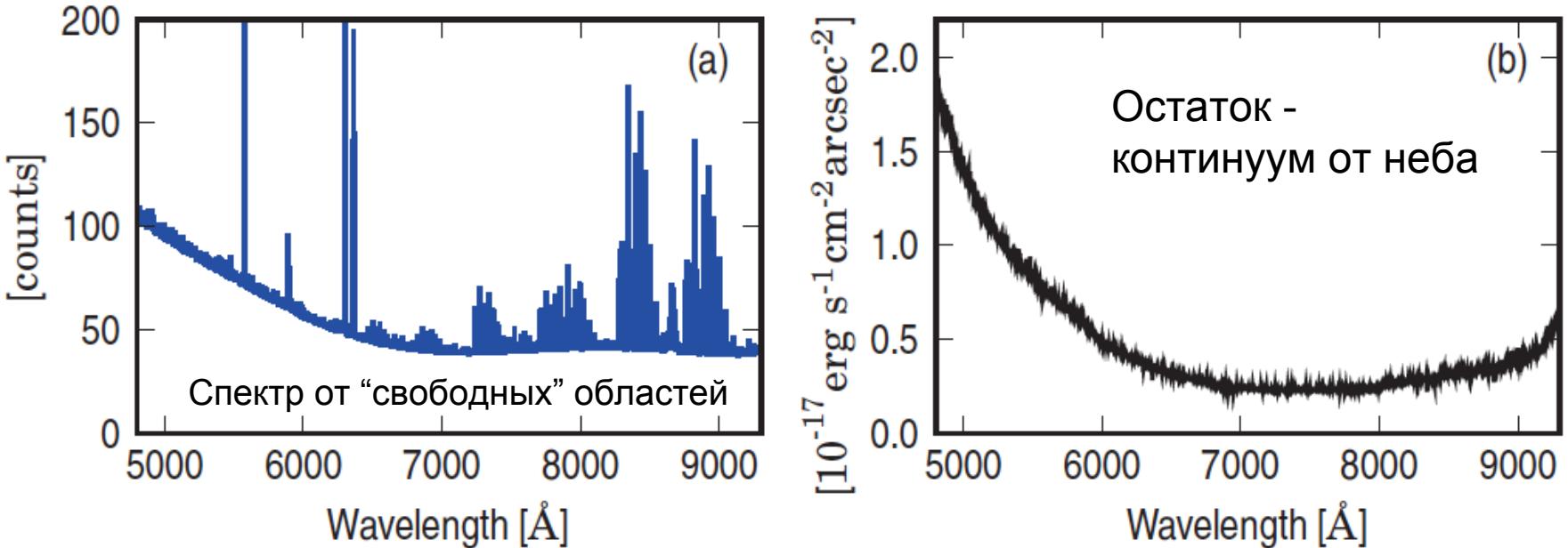
- Точность сдвигов вдоль щели ограничена точностью механических подвижек микроскопов платформы-адаптера, возможны смещения объекта относительно центра щели (до 0.5''), что приводит к заметной потери света.
- Вносятся дополнительные шумы:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{obj+sky}^2 + \sigma_{sky}^2} \approx \sigma_{obj+sky} \sqrt{2}$$

а при вычитании среднего вдоль щели:  
(без учета вариаций аппаратного контура!)

$$\sigma \approx \sigma_{obj+sky} \sqrt{1 + \frac{1}{N_y}}$$

# Вычитание фона неба: моделирование спектра



- знаем LSF, построена адекватная численная модель спектрографа
- подгонка потоков в группах линий:

For the determination of the emission line fluxes, the known atmospheric emission lines (van der Loo & Groenenboom 2007; Osterbrock et al. 1996) are grouped by the originating molecules (OH, [O I], Na I, O<sub>2</sub>) and the upper transitional level into twelve groups. Within each group, the emission flux ratio is fixed. The line fluxes for each group are then taken into a fit routine, minimizing the error of the differences between neighboring bins:

$$s^2(p) = \sum_{\lambda} \left( \frac{\Delta I(\lambda, p)}{\Delta \lambda} - \frac{\Delta I_0(\lambda)}{\Delta \lambda} \right)^2.$$

# Вычитание фона неба: моделирование спектра

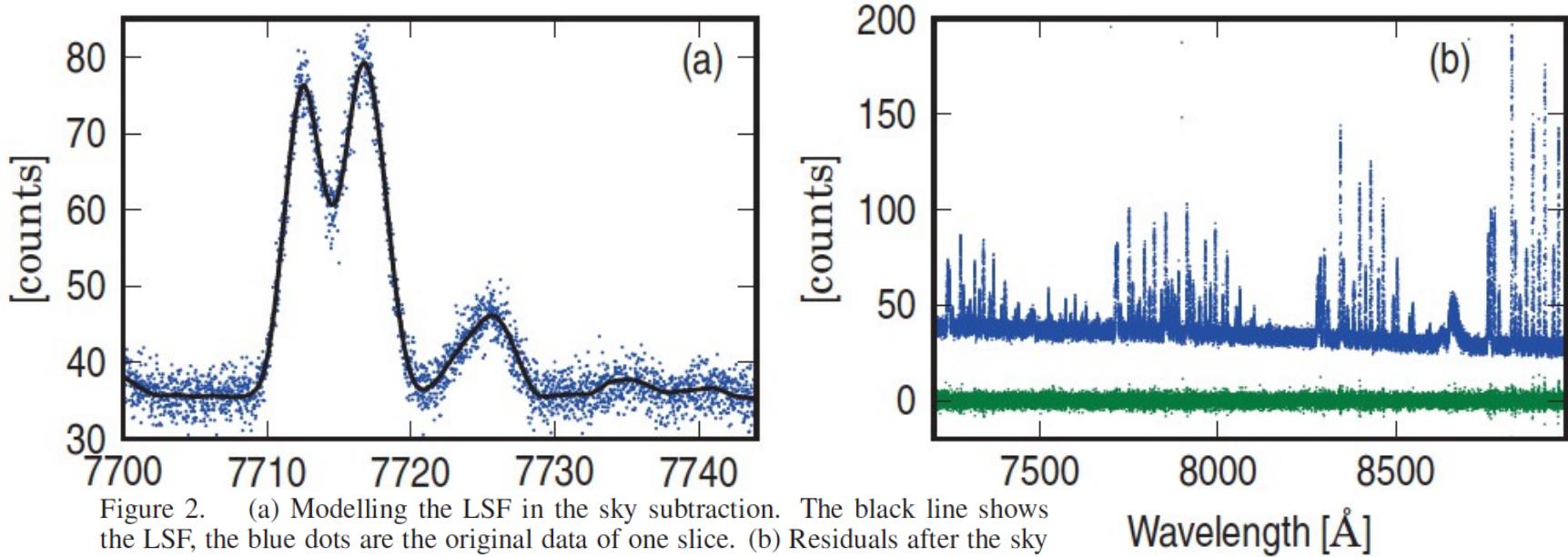
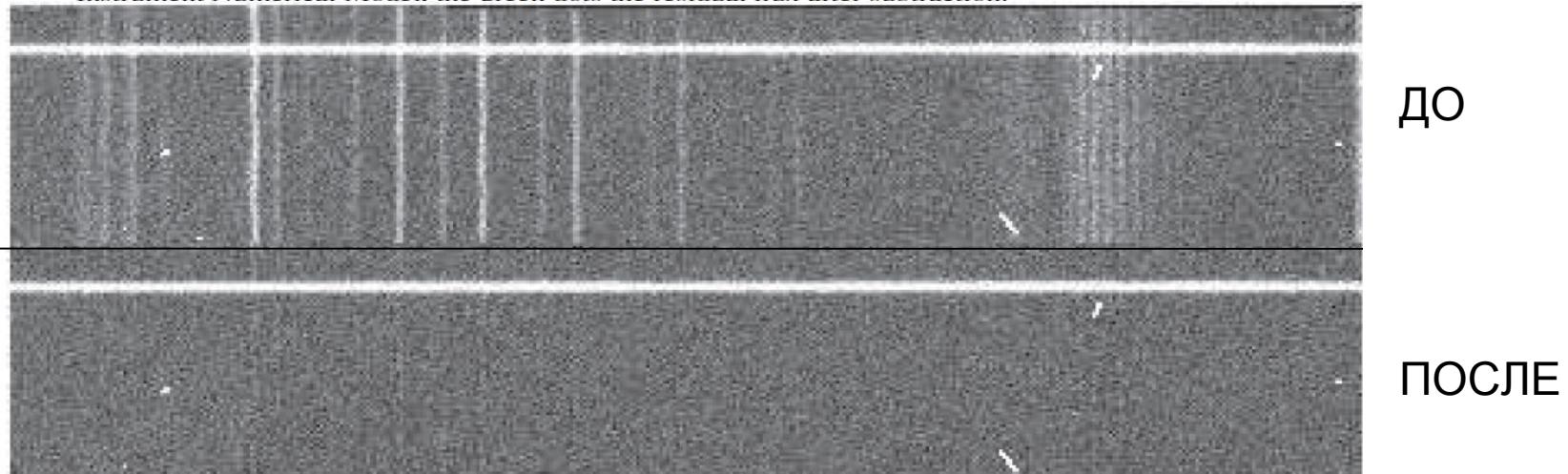


Figure 2. (a) Modelling the LSF in the sky subtraction. The black line shows the LSF, the blue dots are the original data of one slice. (b) Residuals after the sky subtraction for one slice. The blue dots show the original simulated data from the Instrument Numerical Model, the green dots the residual flux after subtraction.



# Выбор оптимальной экспозиции по фону неба

$$N_{\text{obj+sky}} = (F_{\text{obj}} + F_{\text{sky}}) \text{flat}(x, y) + \text{bias}_{\text{obj+sky}},$$

$$k(t) = \frac{D_I(t)}{I(t)}$$

$$N_{\text{sky}} = F_{\text{sky}} \text{flat}(x, y) + \text{bias}_{\text{sky}},$$

$$N_{\text{obj}} = N_{\text{obj+sky}} - N_{\text{sky}}.$$

“передаточная функция  $\text{flat}(x, y)$  определяется в каждом сете наблюдений с некоторой ошибкой, то есть тоже является случайной величиной”

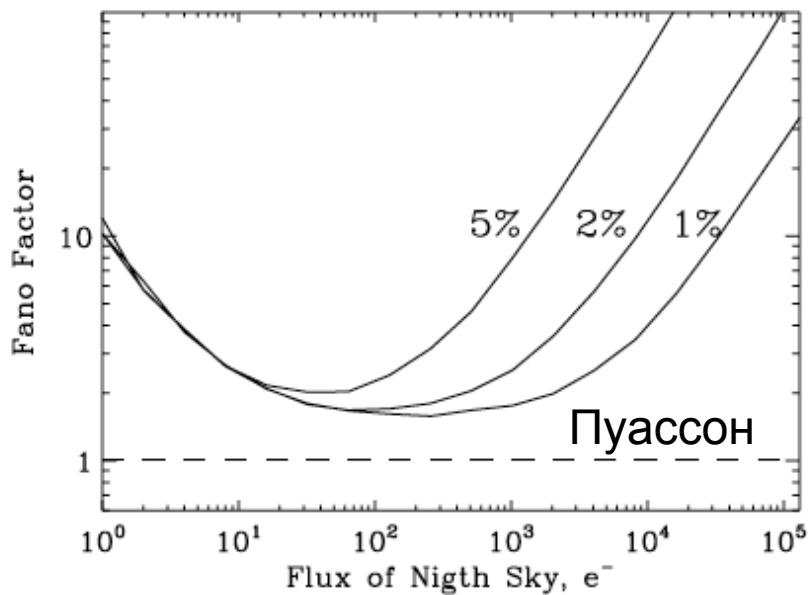


Рис. 3. Зависимость фактора Фано от уровня фона неба для различных значений ошибок определения плоского поля — 1%, 2% и 5%. Штриховой линией

Афанасьева (2016)

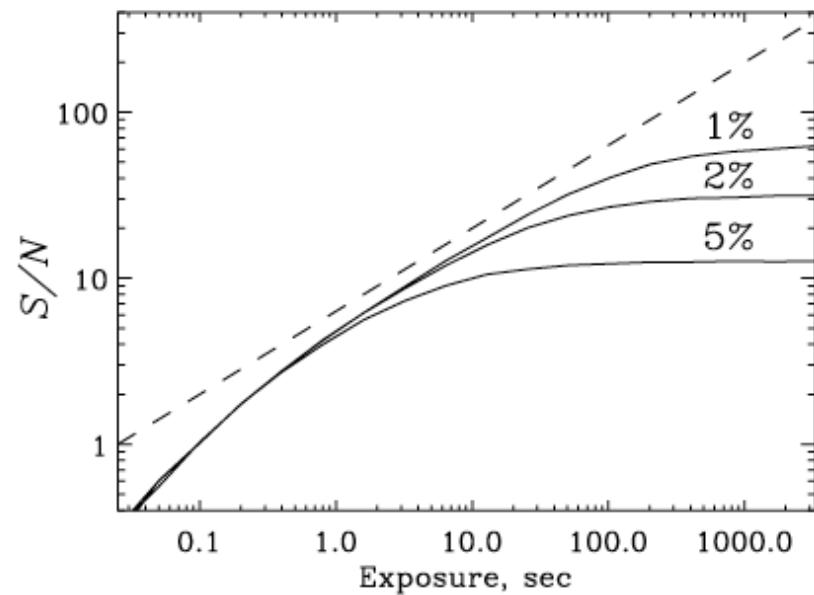


Рис. 4. Отношение сигнал/шум в объекте в зависимости от экспозиции для различных значений ошибок определения плоского поля — 1%, 2% и 5%. Штрих-

# Выбор оптимальной экспозиции по фону неба

На безлунном небе отчет в 100e достигается за 10 сек (V), 5 сек (R)

=> минимальные искажения статистики и максимальное S/N достигается

За ~100 сек (поток >1000 e)

Для увеличения предела обнаружения наиболее правильная стратегия — не увеличение длительности экспозиций а получение большого числа коротких экспозиций

После независимой обработки каждого изображения их можно сложить, и отношение сигнал/шум вырастет в  $\sqrt{N_{\text{exp}}}$  раз. Необходимо, чтобы плоские поля каждой из экспозиций не совпадали — что соответствует получению кадров со смещением объекта, либо наблюдениям в различные ночи. В противном случае величина неоднородности перестает быть случайной величиной, и ее вклад не падает при сложении кадров. Следует заметить, что такой

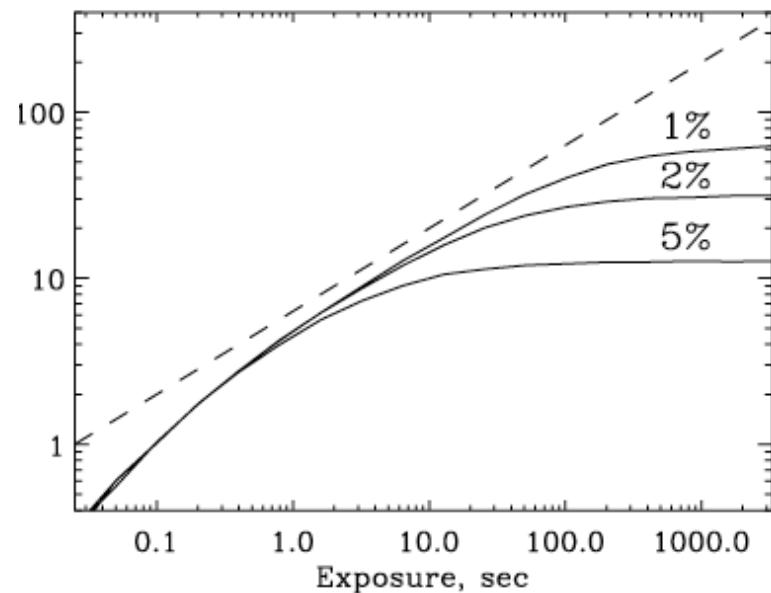


Рис. 4. Отношение сигнал/шум в объекте в зависимости от экспозиции для различных значений ошибок определения плоского поля — 1 %, 2 % и 5 %. Штрих-

# Спектрофотометрия: “вынос за атмосферу”



<http://www.sai.msu.ru/>

**A.В.Миронов**  
**ПРЕЦИЗИОННАЯ ФОТОМЕТРИЯ**  
**Практические основы**  
**прецзионной фотометрии и спектрофотометрии звезд**

Данное учебное пособие отражает содержание срецкурса по практическим основам прецизационной звездной фотометрии, читаемого автором на астрономическом отделении физического факультета МГУ для студентов 4-го и 5-го курсов. Основное внимание уделяется методике и технике современной фотоэлектрической фотометрии и спектрофотометрии звезд и вопросам применения в наблюдательной практике знаний о распределении энергии в спектре изучаемой звезды, о кривых реакции инструментальной и стандартной фотометрических систем и о кривой прозрачности земной атмосферы.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов астрономических специальностей вузов. Оно также может быть полезным лицам, готовящимся самостоятельно проводить астрофотометрические наблюдения.

*Данный текст основан на издании 1997 г.*

<http://www.astronet.ru/>

# “Воздушная масса”

## 3.2. Воздушная масса

Монохроматический поток лучистой энергии от светила при его прохождении через атмосферу может быть записан в виде:

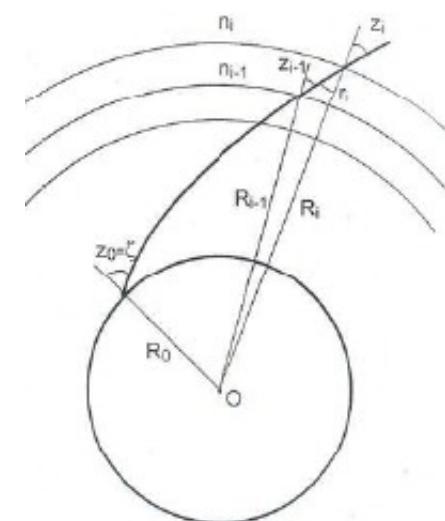
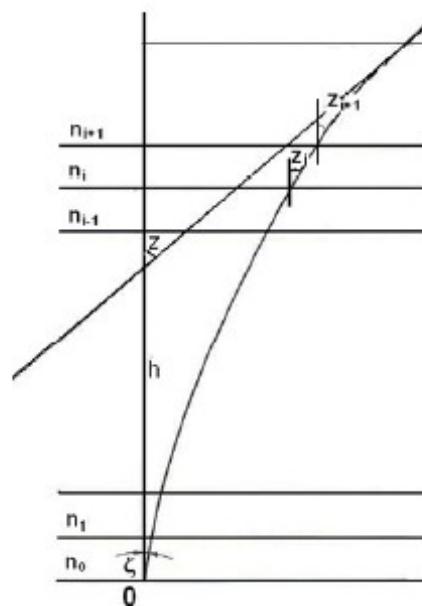
$$S_\lambda = S_{\text{об}} \cdot e^{- \int_0^\infty k_\lambda \rho \cdot ds}$$

Здесь  $S_{\text{об}}$  - поток за пределами атмосферы,  $k_\lambda$  – массовый коэффициент ослабления радиации,  $\rho$  – плотность воздуха,  $ds$  – элемент пути луча. Величину

$$\int_0^\infty k_\lambda \rho \cdot ds$$

обычно называют **оптической массой атмосферы** для луча с длиной волны  $\lambda$ . В актинометрии и в астрономии массу атмосферы

Плоскопараллельная и сферически-симметричная модели атмосферы:

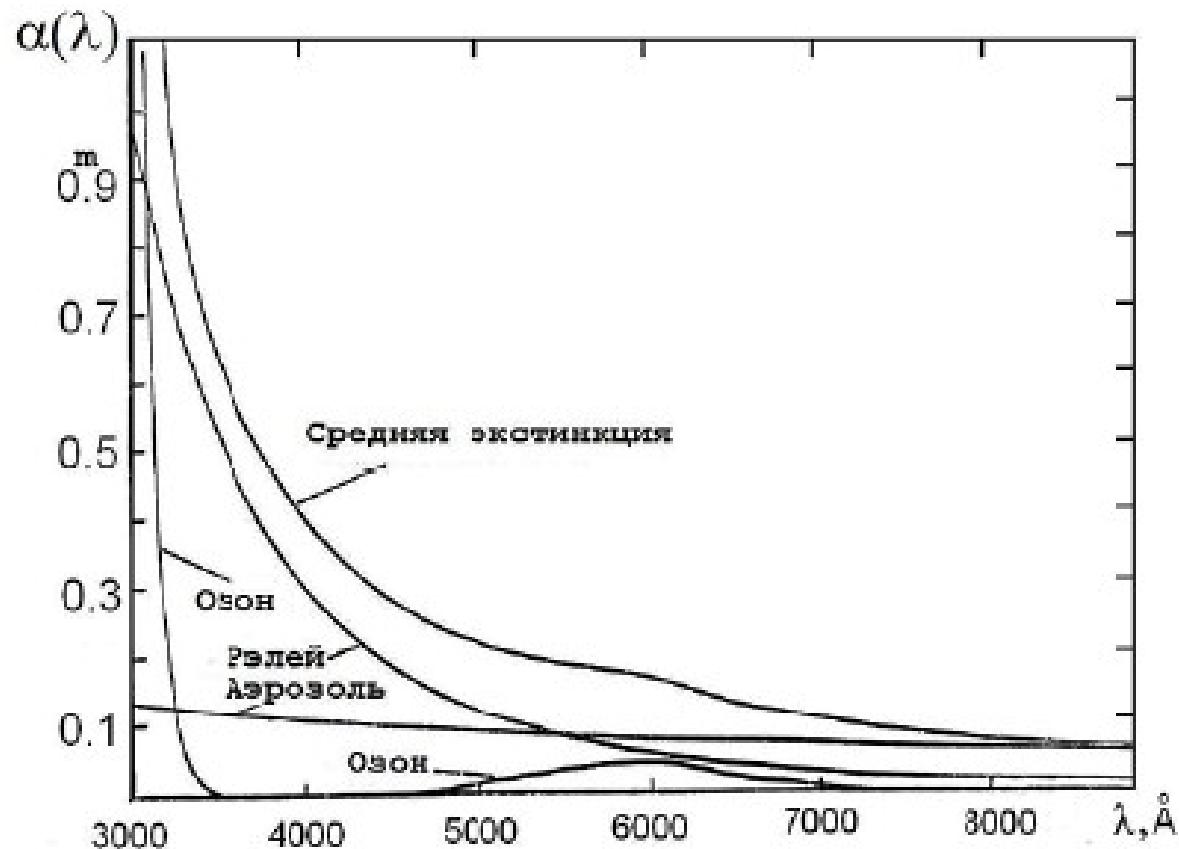


*в астрономии массу атмосферы понимают как безразмерную величину, представляющую отношение оптической массы в направлении на светило к оптической массе в направлении вертикали....*

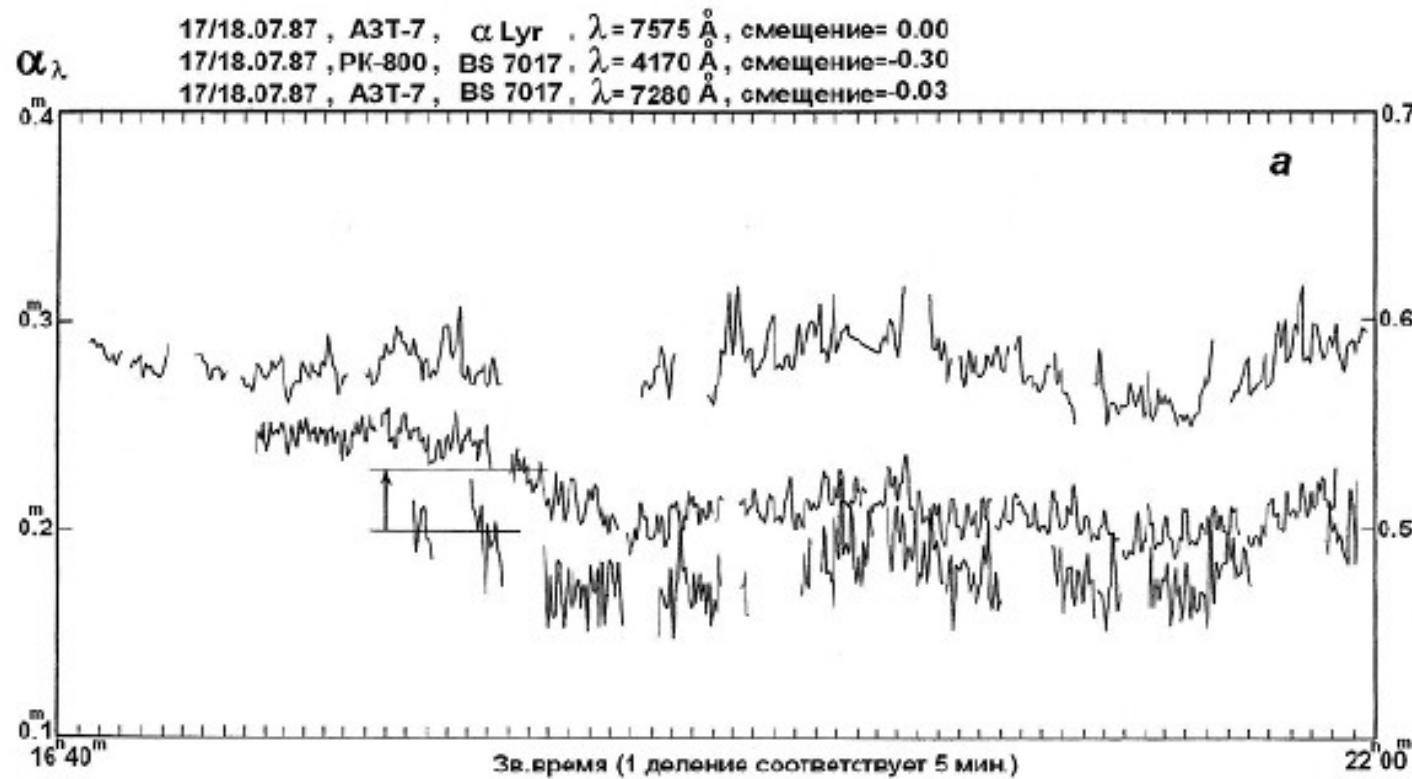
*В первом приближении, принимая атмосферу плоскопараллельной и пренебрегая рефракцией:  $F(z) = \sec z$*

Бурнашев и, Бурнашева (2016)

# Кривая пропускания атмосферы



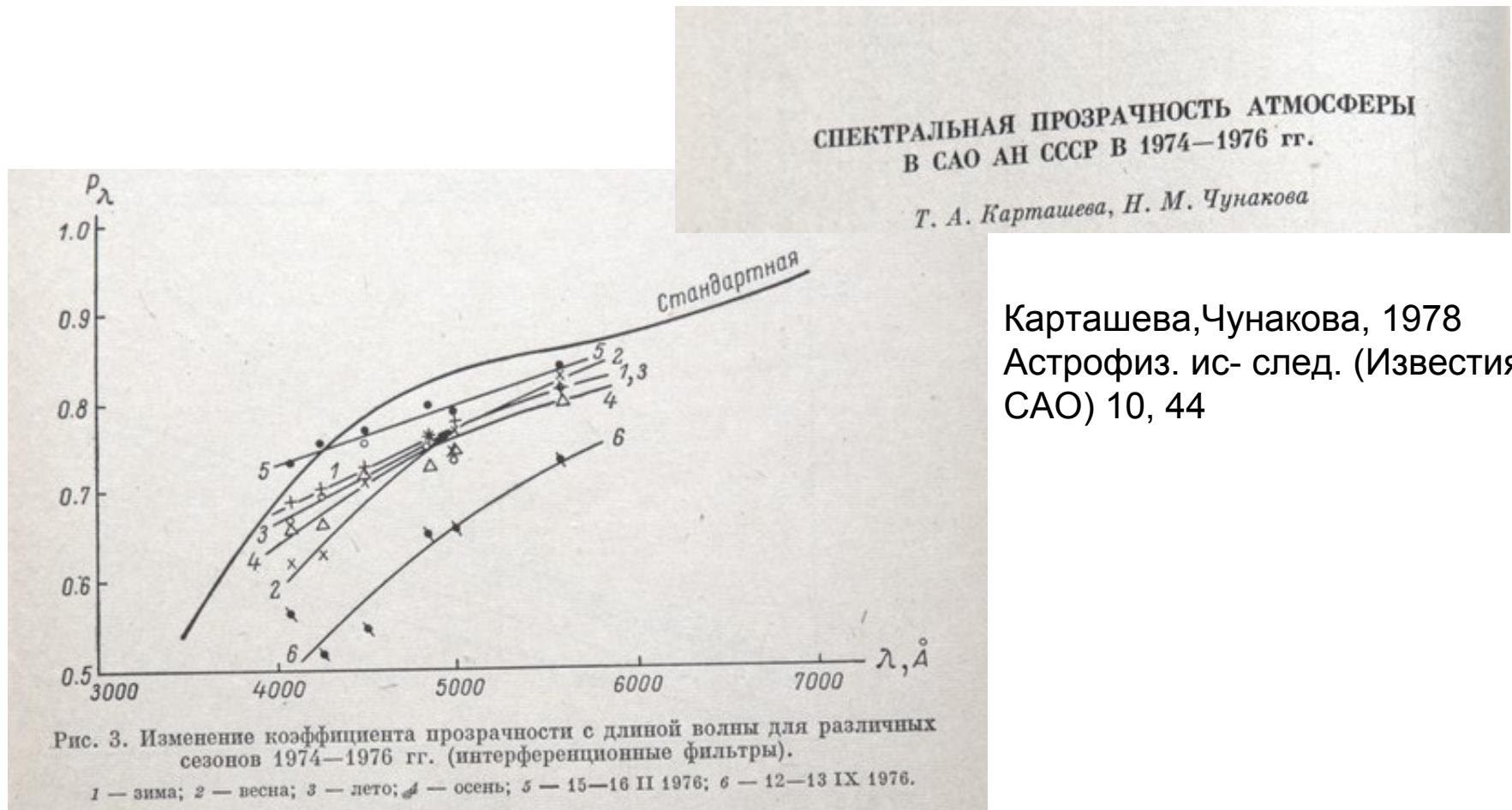
# Изменения в течение ночи



Часто можем положить, что форма кривой  $a(\lambda)$  не меняется

$$(m_\lambda)_{obs} = m_\lambda + \frac{a(\lambda)}{\cos z}$$

Имея минимум два стандарта на разных  $z$ -можем получить требуемую кривую



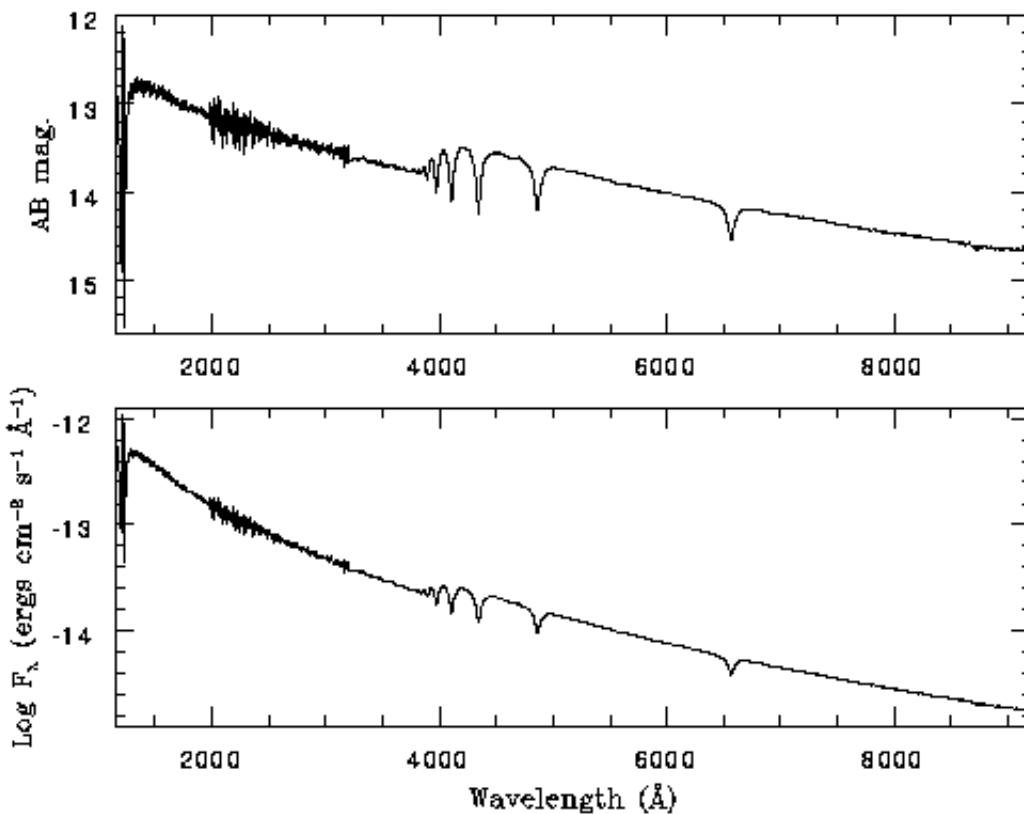
# ESO: RA Ordered List of Spectrophotometric Standards

## ESO: RA Ordered List of Spectrophotometric Standards

[Hz 2](#)

alpha(2000) = 04h 12m 43.51s , delta(2000) = +11d 51' 50.4"

V = 13.88, B-V = -0.09, Spectral type: DA3

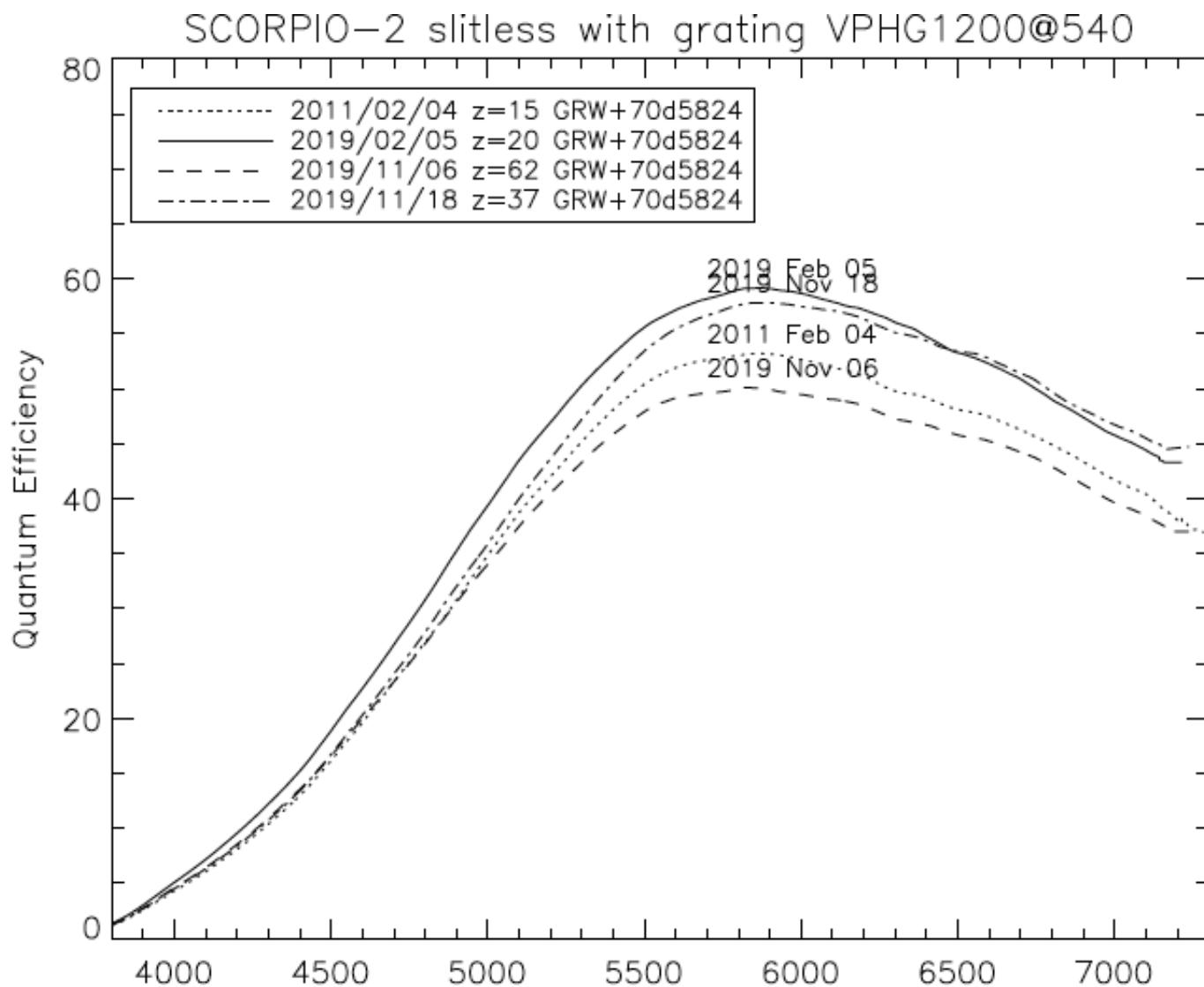


# Проблема ширины щели

Slit =7"

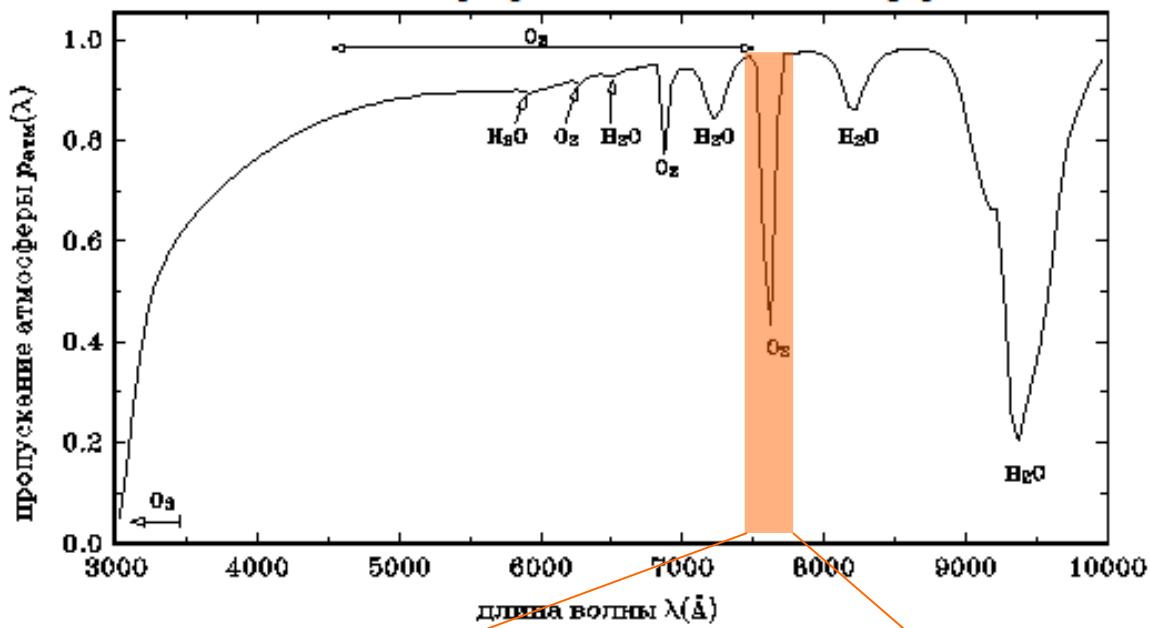
Slit=1"

# Спектральный отклик прибора в терминах QE



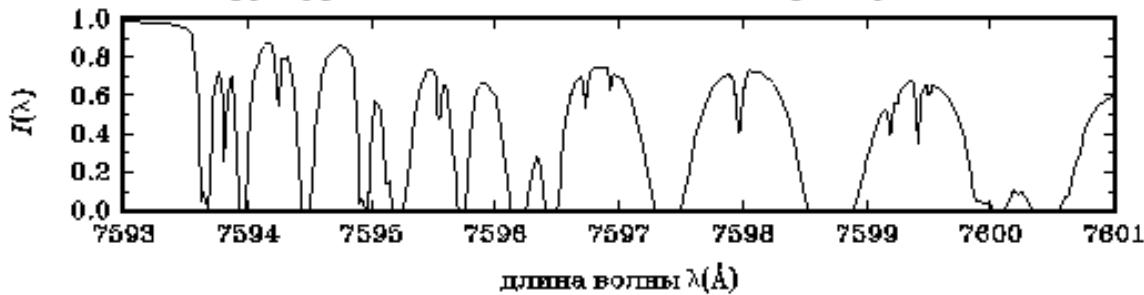
# Атмосферные полосы поглощения.

Рис. 4.13: Сводная зависимость прозрачности чистой атмосферы от длины волны

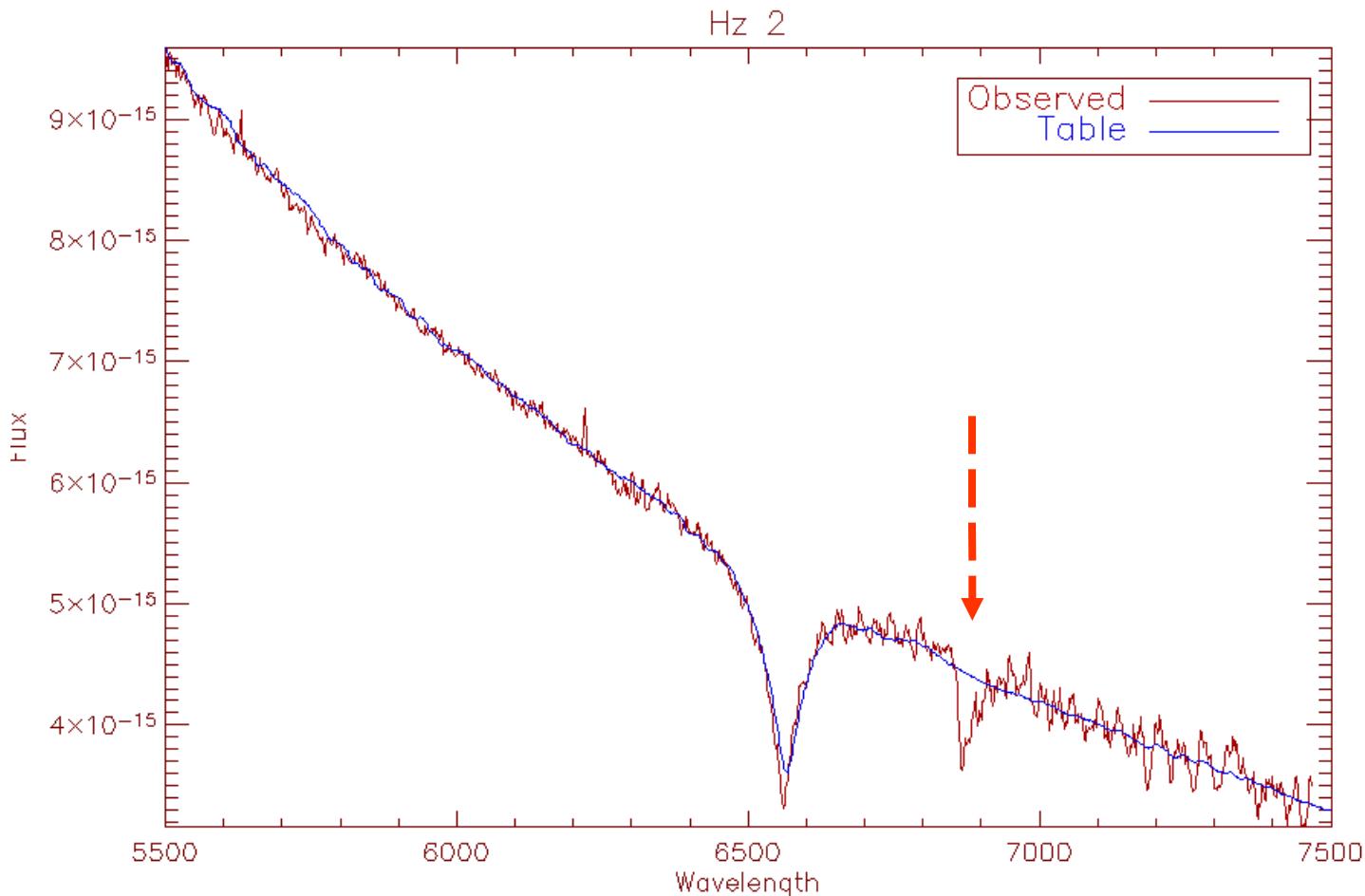


Полосы поглощения молекулярного кислорода и воды могут создать проблему для спектрофотометрии в красной части спектра

Рис.: Структура полосы поглощения кислорода у  $\lambda 7600 \text{\AA}$



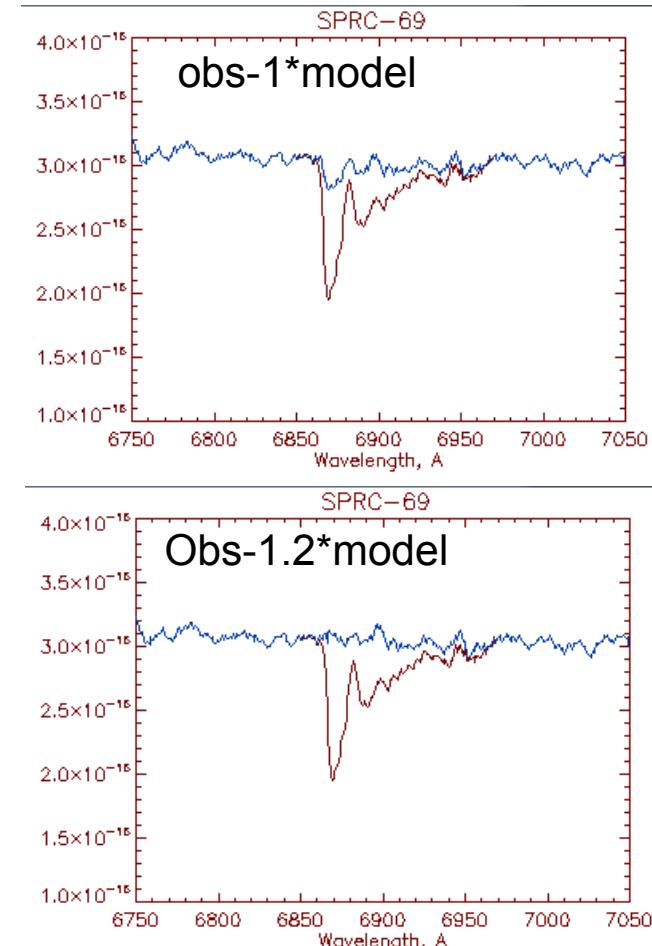
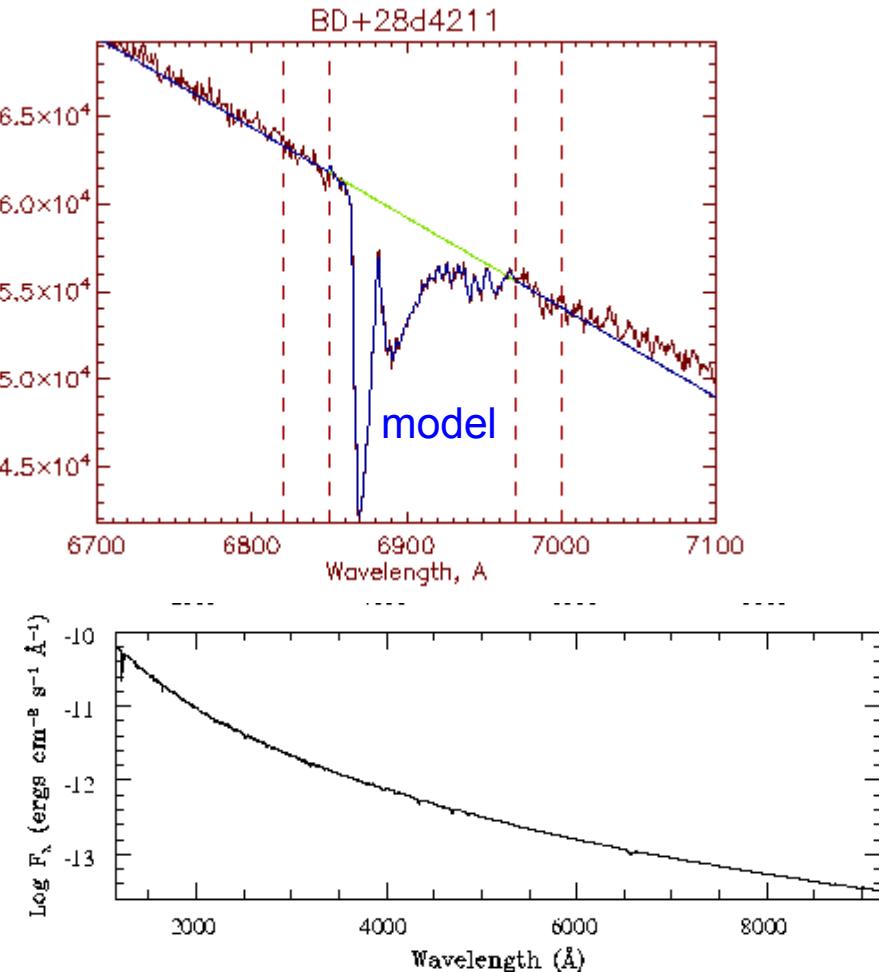
# Атмосферные полосы поглощения.



Полосы поглощения нельзя убрать вычитанием неба – надо строить модель по звездам (желательно снятым на том же зенитном расстоянии) и делить на нее  
➢ Теллурические стандарты (особенно важны в ближнем ИК)

# Атмосферные полосы поглощения.

На практике, часто достаточно использовать спектрофотометрический стандарт, если в нем нет линий в рассматриваемой области. Требуется лишь подобрать коэффициент для вычитания, учитывающий разницу воздушных масс



# Заключение

Важно, чтобы стандарт был снят с той же шириной щели, что и основной объект, а не только в бесщелевом режиме (SCORPIO) или с широкой щелью (SCORPIO-2).

**НЕ НАДО ЭКОНОМИТЬ НА КАЛИБРОВКАХ!**

В рассветное время надо стараться получить максимум возможных калибровочных данных: спектры рассветного неба, стандарт с различной шириной щели...

Даже если это формально не требуется заявителем сейчас, это может понадобиться при обработке архивных данных (восстановить форму LSF, вычесть атмосферные полосы, учесть потери света на щели и т.п.)